

Le certezze di Bohr (07/06/11)

Nei primi anni del '900, si aveva ormai un'idea almeno grossolanamente corretta della struttura di un atomo, specialmente grazie agli esperimenti di Rutherford. Esiste un nucleo contenente quasi tutta la massa e tutta la carica positiva, e attorno a questo nucleo orbitano gli elettroni, leggerissimi e contenenti tutta la carica negativa. Si potrebbe pensare a un'analogia con la struttura del Sistema solare, se non fosse per un dettaglio. Le equazioni di Maxwell (sempre loro!) prevedono che un elettrone, sottoposto ad accelerazione centripeta attorno al nucleo, debba perdere energia emettendo radiazione elettromagnetica, e cadere sul nucleo stesso in una frazione infinitesima di secondo. Come si concilia tutto ciò con la stabilità degli atomi?

Nel 1913, un giovane fisico allievo dello stesso Rutherford, tale Niels Bohr, avanzò una prima ipotesi. Siccome esiste una relazione ben precisa ($E = h \nu$) tra la frequenza della radiazione emessa e la sua energia, gli elettroni possono orbitare attorno ai nuclei solo a distanze tali per cui la transizione da un'orbita all'altra corrisponda a differenze di energia ben precise. Affinché ciò possa accadere, semplici conti mostrano che il *momento angolare* L dell'orbita deve corrispondere a formuletta veramente semplice: $L = n h/2\pi$ dove n è un numero reale (1, 2, 3 eccetera) e h è la costante di Planck. Secondo l'idea di Bohr, non possono esistere orbite con $n = 0$ ma la prima orbita deve cominciare con $n = 1$, e finché un elettrone ruota in una di queste orbite non obbedisce alle equazioni di Maxwell per quanto riguarda l'emissione di radiazione. Può emettere *quanti di radiazione elettromagnetica*, come detto prima, solo se esegue una transizione da un'orbita all'altra.

Ovviamente, la proposta in sé non si basava su alcun principio fisico, ma era fortemente supportata da una serie imponente di riscontri osservativi. In primo luogo quelli di Planck (1900) e di Einstein (1905) sulla quantizzazione della luce. In secondo luogo, lo spettro dell'atomo d'Idrogeno, con i mezzi osservativi dell'epoca, mostrava una corrispondenza esatta con le previsioni dell'atomo di Bohr. Dunque, qualcosa di vero doveva esserci, anche se atomi più pesanti mostravano differenze tra le previsioni di Bohr e le osservazioni. In prima battuta, Sommerfeld ci mise molte pezze aggiungendo altri *numeri quantici* oltre a n , e introducendo orbite ellittiche e via discorrendo, per ottenere accordi sempre migliori tra la teoria e le osservazioni, ma il principio di base mancava ancora.

Nel 1926, due fisici di estrazione molto diversa, il venticinquenne e rivoluzionario Werner Heisenberg, e il trentanovenne e conservatore Erwin Schrödinger, giunsero per vie apparentemente inconciliabili a quella che fu poi dimostrata essere la stessa soluzione del problema, e che conteneva in sé la chiave della Meccanica quantistica. L'approccio di Heisenberg era altamente matematico; quello di Schrödinger molto più tradizionale o, per lo meno, così credeva lo stesso Schrödinger il quale, una volta che gli furono chiarite le implicazioni del suo modello, rimpianse di essersi ficcato in quel letamaio. Seguiremo l'approccio di Schrödinger.

Nel 1924 un nobile francese, Il futuro settimo conte de Broglie, aveva ipotizzato che, siccome un'onda elettromagnetica può comportarsi come una particella (secondo la spiegazione data da Einstein dell'Effetto fotoelettrico), anche una particella può comportarsi da onda, e semplici considerazioni lo condussero al calcolo della lunghezza d'onda λ associata a una particella di massa m e velocità v . Per la precisione: $\lambda = h/mv$. Su questa base, Schrödinger impostò un'equazione delle onde dall'aria quasi *settecentesca*, in cui si descrive l'evoluzione nel tempo dell'onda associata a una particella carica in un potenziale elettrico. Nelle sue intenzioni, l'equazione avrebbe condotto a una determinazione della variazione temporale della posizione (o velocità) della particella/onda, e dunque doveva essere il fondamento di quella che a lui sembrava potersi definire tranquillamente *Meccanica ondulatoria*. Aveva ragione in quanto alla facilità e generalità d'uso della sua equazione, che è imparata anche dagli studenti al giorno d'oggi, e fornisce un'ottima approssimazione nello studio dei casi in cui la velocità della particella è molto inferiore a quella della luce; si sbagliava grossolanamente in quanto alla *classicità* della sua equazione.

I suoi primi colloqui con Bohr lo irritarono e lo delusero profondamente. Infatti, gli fu subito chiaro che la sua equazione era proprio lo strumento mancante alla nascente Meccanica quantistica, ma purtroppo l'onda non rappresenta nulla di fisicamente significativo, poiché in essa compaiono numeri complessi, e cioè con una parte immaginaria, e ciò non corrisponde a quantità fisiche direttamente sperimentabili. Fu invece un altro fisico di grande intelletto, Max Born, a scoprire nel 1928 che l'"onda di Schrödinger", elevata al quadrato, fornisce la *probabilità* (e questa sì che è una quantità fisica misurabile, anche se solo in modo statistico) che la particella in esame si trovi in una certa posizione. Gaudio di Bohr che in tal modo ritrovò, per mezzo dell'equazione di Schrödinger applicata alla posizione e alla velocità della particella, il Principio d'indeterminazione di Heisenberg che, a quel punto, fu elevato a Principio fondante della Meccanica quantistica: posizione e velocità di una particella sono un po' indeterminate non perché non si *riesca* a misurarle bene, ma perché *non esistono* finché non sono misurate, e anche allora la loro *localizzazione* in senso lato è un po' imprecisa. Furia e sgomento di Einstein, Planck, Schrödinger e altri. Prese così corpo la cosiddetta *Interpretazione di Copenaghen* (Bohr lavorava lì) della Meccanica quantistica, con i due caposaldi imposti dallo stesso Bohr:

- 1) Durante una misura quantistica, avviene il *collasso della funzione d'onda* e la particella acquista *realtà* il tempo sufficiente a misurarla. Altrimenti non si spiega come lo strumento di misura, i cui atomi rispondono anche loro all'equazione di Schrödinger come la particella in esame, non fornisca risposte vaghe e indeterminate, ma risposte precise.
- 2) Le particelle e le onde si possono comportare, secondo il tipo di esperimento, in modo particellare o ondulatorio, ma mai contemporaneamente in entrambi (Principio di complementarità).

Ne seguirono le dispute culminate nel 1936 col povero gatto di Schrödinger e coll'esperimento EPR di Einstein, che costrinse Bohr ad ammettere che la Meccanica quantistica deve essere *non locale*, senza che lui stesso se ne rendesse del tutto conto altrimenti, forse, non l'avrebbe detto.

Attorno al 1950, David Bohm tentò una variante della teoria in cui le particelle sono sempre *reali*, ma pilotate da una non meglio specificata *onda guida* che, peraltro, lasciò scettici quasi tutti i fisici, compreso Einstein.

Che si può dire oggi? Che il *collasso della funzione d'onda* non convince più nessuno. Lo strumento di misura *deve per forza* obbedire anche lui all'equazione di Schrödinger, e nessuna spiegazione del tutto persuasiva è stata finora data del fatto che il risultato della misura sia sempre univoco. Esistono spiegazioni fantascientifiche (ipotesi a molti mondi e altre) e scientifiche (decoerenza e altre), ma non c'è accordo tra i fisici, perché si può dimostrare che ogni spiegazione ha punti deboli che si limitano a spostare il problema e non lo risolvono. E, per quanto riguarda il Principio di complementarità, solo di recente la tecnologia è stata resa capace di sfidarlo. Risultato: alcune misure un po' complicate da descrivere sono in grado di evidenziare *contemporaneamente* sia l'aspetto corpuscolare, sia quello ondulatorio, dell'oggetto misurato (per ora solo fotoni; in pochi anni ci si riuscirà anche con gli elettroni).

Una ciliegina sulla torta: Le più recenti verifiche, per mezzo della tecnica "a misura debole" che non possiamo discutere qui, sull'esperimento a doppia fenditura, *sembrano* suggerire una realtà fisica non troppo lontana dalla teoria di Bohm. Il che, invece di semplificare il quadro, lo complicherebbe, perché l'*onda guida* deve essere in grado di propagarsi non solo nello spazio a velocità infinita, ma anche nel tempo. In un istante deve investigare tutto il passato e il futuro, e *riportare indietro* l'informazione alla particella, altrimenti sarebbe impossibile spiegare anche il più semplice esperimento di Meccanica quantistica.

Così stanno le cose e i fisici concordano almeno su quanto segue: se Bohr fosse stato informato degli attuali risultati sperimentali, sarebbe stato almeno molto, molto più cauto nel parlare ... ma questo non avrebbe fatto comunque piacere a Einstein ... Dio gioca a dadi, e con dadi truccati. Per di più, li getta dove non possiamo vederli ...